

COMPARAISON DE METHODES ANALYTIQUES ET NUMERIQUES DANS L'ANALYSE DE LA STABILITE DU TOIT D'UNE CARRIERE SOUTERRAINE

Farid LAOUAFA et Jean-Jacques TRITSCH

INERIS, Parc Technologique ALATA, BP.2, 60550 Verneuil-en-Halatte, France

RÉSUMÉ – Les mécanismes de déformation et de rupture au sein d'un massif, perturbé par le creusement de galeries souterraines, sont très complexes. L'analyse de la stabilité est souvent abordée à l'aide de méthodes analytiques simples qui, de par leurs hypothèses, se révèlent trop pessimistes. Des méthodes plus évoluées, essentiellement numériques, se substituent parfois avec un certain succès à ces dernières dans des conditions plus complexes. Cet aspect est développé dans cette communication.

Mot clés : carrière souterraine, comparaisons, méthodes analytiques, modélisations, éléments finis

1. Introduction

Les carrières souterraines ont connu, sur le territoire national, une activité soutenue depuis de nombreuses décennies. Si la plupart d'entre elles sont aujourd'hui abandonnées, beaucoup d'autres subsistent encore, s'étendent ou se créent. Les carrières souterraines font désormais l'objet d'exigences strictes concernant la stratégie d'exploitation et le dimensionnement des structures, ceci dans le souci de garantir à la fois la production, la sécurité du personnel et leur stabilité à long terme. En matière de stabilité, la plus grande difficulté concerne le dimensionnement des galeries (largeur ou « portée ») et l'analyse du comportement du toit. Une approche analytique simple suffit en effet souvent à évaluer la résistance des piliers, moyennant certaines précautions de calcul.

La difficulté pour la détermination de la stabilité du toit d'une carrière réside dans la caractérisation (mécanique, constitution, histoire, etc.) de l'état initial du recouvrement. Les mécanismes de déformation et de rupture dans le toit sont en effet tributaires de nombreux paramètres (stratification, fractures, nature des joints, propriétés des différentes strates, etc.).

Des méthodes dites analytiques, fondées principalement sur la théorie des plaques et des poutres sont couramment utilisées pour statuer sur l'état d'équilibre du toit. Ces méthodes s'appuient sur de nombreuses hypothèses dont certaines d'entre-elles sont beaucoup trop fortes (joints lisses, problèmes plans, distribution uniforme des efforts, rhéologie, etc.).

La modélisation numérique, par élément finis par exemple, peut donner une vision plus pertinente du comportement de telles structures, dès lors que les données nécessaires à une description suffisamment réaliste de l'état du toit sont disponibles.

Sur le cas réel d'une carrière souterraine de calcaire du bassin parisien, nous comparons les prédictions (en terme de stabilité) issues de méthodes analytiques et celles issues de la modélisation numérique. Nous montrons que les méthodes simples sont, d'une manière générale, beaucoup trop pessimistes et ne peuvent traduire pour ce site le comportement réel. Une bonne prise en compte des caractéristiques lithologiques et mécaniques du toit et de la couche montrent, cependant, la possibilité d'établir une modélisation numérique pertinente pour ce problème.

Toutefois, le calage du modèle, établi à partir de l'observation des ouvrages souterrains et des ruptures, en particulier, permet d'aboutir à un diagnostic réaliste qui confirme la nécessité d'une démarche d'analyse approfondie qui implique une caractérisation détaillée des terrains de recouvrement.

2. Description et position du problème de stabilité d'une carrière

Les carrières souterraines sont nombreuses sur le territoire national et connaissent une activité soutenue depuis plusieurs années. La géométrie des chambres et des piliers varie selon la résistance mécanique de la roche, l'épaisseur et les ondulations de l'horizon exploitable. Elle a pu en outre évoluer au cours du temps avec d'une part, la mécanisation de l'extraction, et d'autre part, l'application de certains schémas d'exploitation. Ainsi, dans les exploitations de gypse de la région parisienne, la section des galeries est trapézoïdale.

Les carrières souterraines qui sont généralement situées à faible profondeur (quelques mètres à quelques dizaines de mètres) présentent généralement, comme toit immédiat, un banc suffisamment raide qui constitue le "ciel" de carrière. La présence de ce banc s'impose car la faible épaisseur et les propriétés médiocres du recouvrement, ne permettent pas à ce dernier de contribuer mécaniquement à la reprise des efforts qui sont redistribués par la création des vides souterrains. Le recouvrement de faible épaisseur est en général constitué d'une alternance de bancs plus ou moins épais, plus ou moins fracturés, séparés par des joints de discontinuités. On peut également rencontrer parfois des passées argileuses ou marneuses peu résistantes qui créent des discontinuités franches entre deux bancs. Le haut du recouvrement peut être marneux, argileux ou sableux et donc participer donc peu ou prou à la stabilité globale de l'ouvrage.

Dans un tel contexte géologique, il est difficile d'établir avec précision le degré de stabilité de l'ouvrage si ce dernier n'est pas déjà rompu. Il est en général admis que l'état de fissuration (densité et distribution) au sein de ses bancs joue un rôle majeur sur leur résistance (Goodman, 1989, Obert & Duvall, 1967), cependant leur localisation ainsi que l'évolution de leur altération physico-chimique est souvent mal connue. Ce qui peut conduire à un « vieillissement » de certaines parties de la carrière et son effondrement total ou partiel (Fig.1)



Figure 1 : Exemple d'éboulement du premier banc de toit dans une carrière de calcaire.

Une autre difficulté, dans cette problématique, réside dans la caractérisation mécanique des joints (stratigraphiques) et des discontinuités. Le comportement d'un milieu stratifié est naturellement complexe (Maury, 1970). La nature de la discontinuité dépend non seulement de la nature des faciès qu'elle délimite (avant exploitation) mais également des différents mécanismes de déformation du massif, liés à l'exploitation. Ces quelques remarques traduisent la difficulté de "poser" le problème mécanique avec plus ou moins de précision. Ce qui explique que l'on a souvent recours à des méthodes dites simplifiées. Les observations visuelles menées in situ, ainsi que les éventuels sondages et carottages, peuvent ne pas être suffisantes et n'apporter que quelques éléments de réponse à la question de stabilité.

3. Hypothèses et difficultés des méthodes analytiques dans l'évaluation de la stabilité du toit

Les différentes méthodes analytiques (Courbon, 1955, Mandel, 1959, Timoshenko et al., 1961) reposent sur de nombreuses d'hypothèses (élasticité linéaire, par exemple). Les deux principales méthodes sont basées sur l'assimilation du banc soit à une plaque soit à une poutre (Fig. 2). Les conditions aux limites cinématiques peuvent varier (appuis simples, encastrements parfaits, etc.) ainsi que celles statiques (uniforme, prise en compte d'une coche (voûte) de décompression).

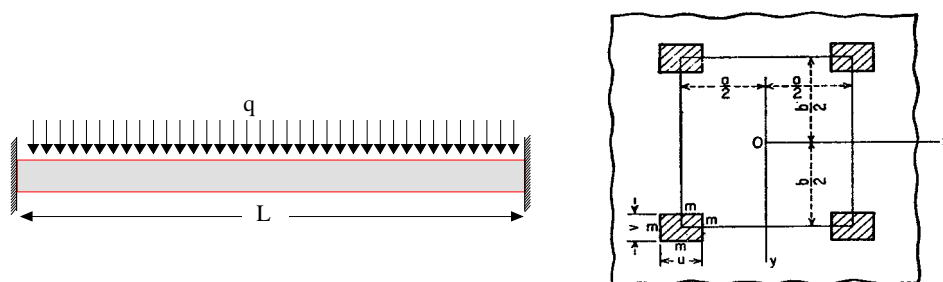


Figure 2 : Schéma d'une poutre doublement encastree et d'une plaque sur appuis (Timoshenko, 1961).

Le modèle de poutre peut se substituer au modèle de plaque si la dimension perpendiculaire au plan de chargement est très grande vis-à-vis de la largeur L de la galerie.

Cette approche est d'une manière générale très pessimiste, car elle sous-entend qu'un seul élément du toit contribue à la stabilité du recouvrement. En utilisant ces approches on pourrait très fréquemment, conclure à la ruine d'un ouvrage qui se trouve toujours en place et intact. On serait donc amené à penser que si ces méthodes concluaient à la stabilité de l'ouvrage, cette dernière serait manifestement garantie avec un coefficient de sécurité relativement élevé.

Cependant, lorsque l'on recense les hypothèses relatives à l'assimilation d'une partie du recouvrement en dalle ou poutre, on peut constater que l'on omet souvent de mentionner l'hypothèse qui est certainement la plus forte : celle relative au caractère « monolithique » ou homogène sur son épaisseur. En effet, si le banc massif est réel et bien défini, il ne s'agit plus d'une hypothèse mais d'une donnée. Lorsque la démarche consiste à définir un unique banc par le regroupement de plusieurs petits bancs distincts, il ne s'agit plus d'une donnée mais d'une approximation plus ou moins grossière dépendant de la nature des joints existant entre les strates. Le caractère homogène n'est pas respecté et les paramètres mécaniques déduits pour le banc « équivalent » sont difficilement déterminables même par une méthode d'homogénéisation.

4. Etude d'un cas

4.1 Présentation du site

Il s'agit d'une carrière de calcaire grossier située dans la région de Reims, exploitée par la méthode chambres et piliers (Fig. 3). La série des couches exploitées fait partie des formations carbonatées du Lutétien moyen de la partie terminale orientale du Bassin Parisien. La base, constituant le mur, est formée d'alternance de bancs calcaro-sableux, tandis que le recouvrement est en totalité constitué par les alternances argilo-marneuses et calcaires, plus ou moins dolomitiques, désignées de marnes et caillasses du Lutétien supérieur continental.

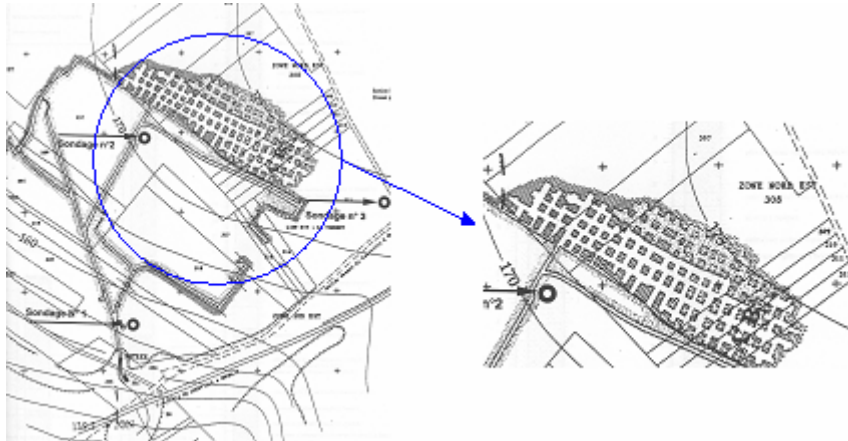


Figure 3 : Schéma d'exploitation de la carrière.

Cette carrière présente deux parties d'exploitation très distinctes : la partie sud, exploitée par hagues et bourrages et la partie nord exploitée par chambre et piliers de 6 x 6 m et un taux de défrèvement d'environ 75 %.

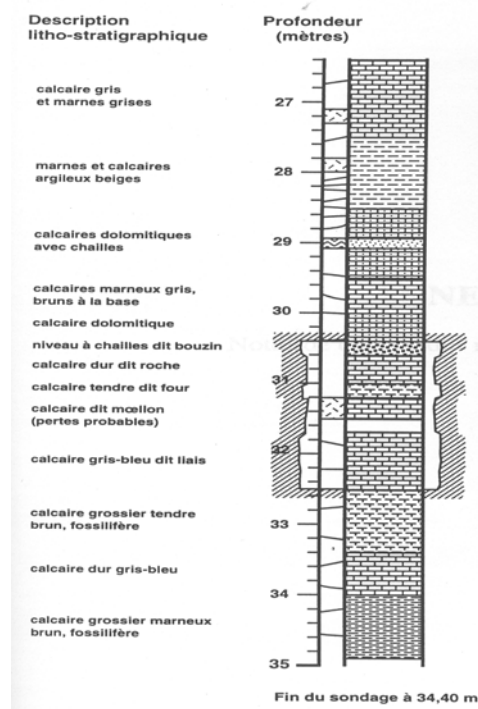


Figure 4 : Coupe litho-stratigraphique du site.

4.2 Observations et conclusions des méthodes analytiques

Dans certains secteurs de la carrière, les galeries font 6 m de largeur et dans d'autres secteurs 7 m de largeur. Il a été observé au niveau des galeries de 7 mètres de large, une fissure située à mi-travée et dans l'axe de la galerie, alors que les galeries présentant 6 mètres de portée n'étaient sujettes à aucun désordre particulier. L'épaisseur du recouvrement au droit de ces différentes galeries est d'environ 30 mètres.

Dans ce qui suit nous nous intéressons uniquement à la stabilité du toit et non des piliers. Les méthodes de poutres bi-encastées et de plaques (Tritsch, 1996) aboutissent à un coefficient de sécurité (FS) inférieur à 1, si l'on considère l'intégralité du recouvrement. La dalle calcaire dolomitique est stable lorsqu'elle ne supporte que son propre poids, même pour les galeries de 7 m. Quelles que soient les largeurs des galeries, ces dernières deviennent instables ($FS < 1$) si l'on considère ne serait ce qu'une partie du recouvrement. Cela est naturellement dû à la surcharge générée par la partie du recouvrement qui ne participe qu'en « charge morte ».

4.3 Modélisations numériques

Le même problème a été analysé en utilisant des modélisations numériques par éléments finis. La Figure 5, ci-dessous, indique le maillage du modèle ainsi qu'un « zoom » au voisinage du bas-toit.

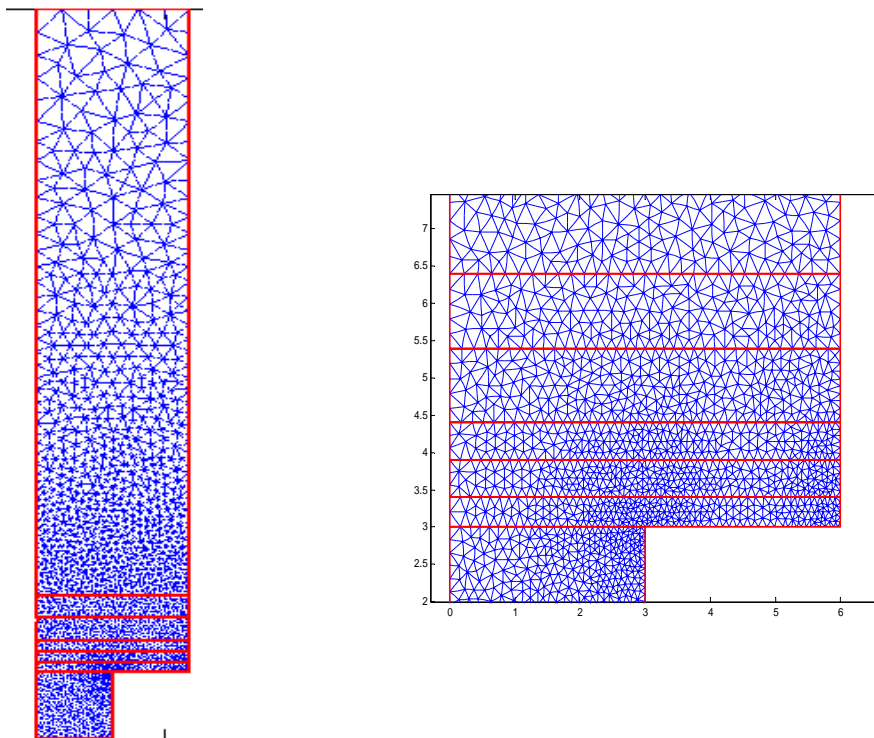


Figure 5 : Maillage du modèle ainsi qu'un « zoom » au voisinage du bas-tôit.

Les ruptures observées, se situant dans l'axe de la galerie, nous confortent dans le choix de l'hypothèse de déformation plane. En effet le plan de flexion privilégié semble être perpendiculaire à l'axe de la galerie.

Les traits horizontaux correspondent à des joints et délimitent différents faciès. Pour des raisons de symétrie une ½ galerie est modélisée (soient : 3 m pour la galerie de 6 m et 3,5 m pour la galerie de 7 m). Les propriétés mécaniques des différentes strates du recouvrement sont celles issus de l'étude (Tritsch, 1996).

Dans la figure 5 nous avons représenté la plastification (en noir) dans le recouvrement résultant de l'exploitation. Ces résultats obtenus à l'aide de la modélisation numérique par éléments finis (code VIPLEF-ENSMP) d'un modèle continu (sans joint de discontinuité) indiquent que la plastification se développe au niveau du banc de calcaire marneux pour les deux galeries (6 et 7m). Cependant la modélisation retrouve la rupture au milieu de la travée de 7 m de largeur.

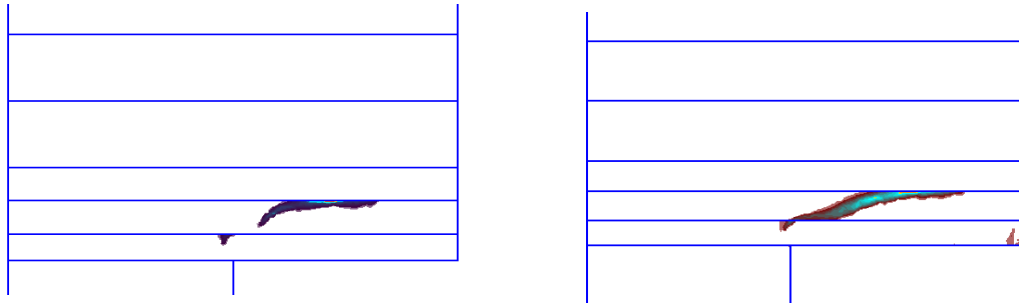


Figure 6 : Plasticité (noir) dans les premiers bancs. Galerie de 6 m (gauche) et de 7 m(droite).
(modèle sans joint de discontinuité)

Il est à souligner, que même si aucun élément précurseur d'une instabilité n'est visible in situ (toit sain) il se peut que l'endommagement ou la rupture se soit déjà initié dans le recouvrement (Fig. 6 gauche). Ce dernier n'étant pas visible peu conduire à des conclusions erronées sur l'état de stabilité de la galerie.

La figure 7 représente quant à elle la plasticité (à gauche) et la déformation volumique (à droite) que l'on obtient lorsque l'on considère des joints de discontinuité parfaitement lisses.

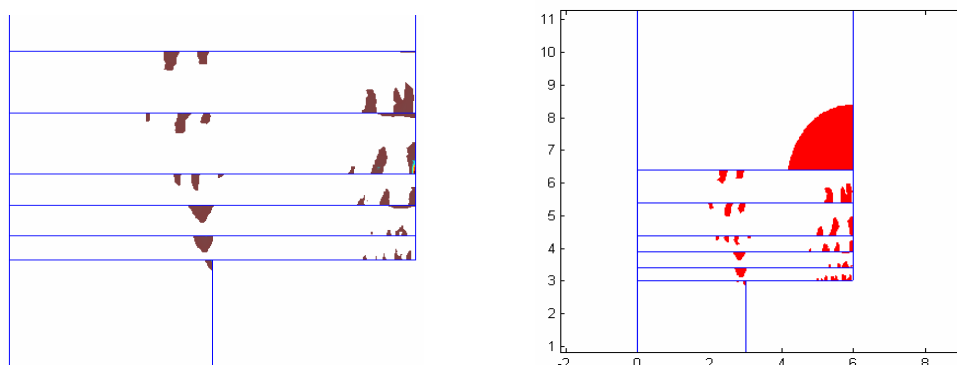


Figure 7 : Galerie de 6 m de largeur : Plasticité (noir) à dans les premiers bancs (gauche) et déformation volumique positive (droite).
(modèle avec joints de discontinuités lisses)

Notons que, dans cette configuration, la rupture (essentiellement de traction) ce développe au sein de tous les bancs. La distribution de la rupture traduit un mécanisme de flexion de poutre encastree, travaillant de manière sensiblement individuelle. La distribution et l'extension des zones de déformation volumique positive (dilatant) indiquent clairement la présence d'une

cloche de décompression et le complémentaire de cette zone (contractant) les zones de compression. On imagine aisément les lignes isostatiques de compression.

On peut conclure qu'au vu des observations effectuées in situ, que les joints de discontinuités entre les différentes strates ont participé mécaniquement et solidarisé l'ensemble du bas toit. La figure 8 représente également la plasticité (à gauche) et la déformation volumique (à droite) que l'on obtient lorsque l'on considère des joints de discontinuité parfaitement lisses.

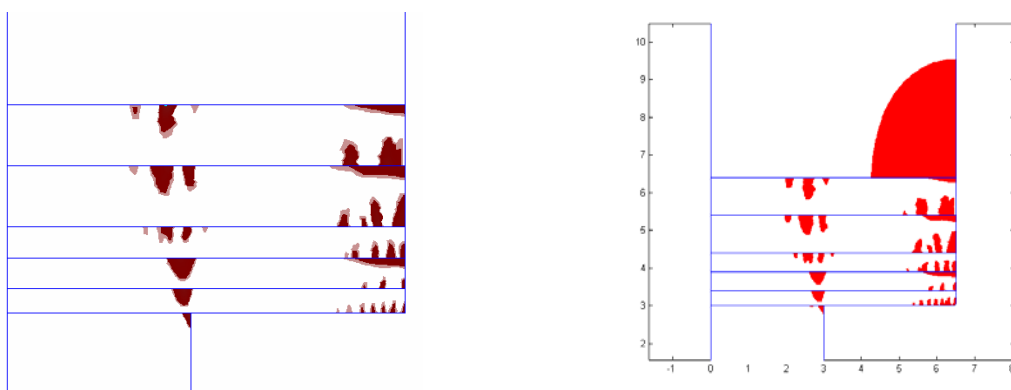


Figure 8 : Galerie de 7 m de largeur : Plasticité (noir) à dans les premiers bancs (gauche) et déformation volumique positive (droite).
(modèle avec joints de discontinuités lisses)

Les conclusions sont identiques, à part que les différents éléments (ruptures et dilatances) sont plus marqués. La figure 9, indique la distribution de la contrainte verticale σ_{yy} agissant au niveau de différents joints

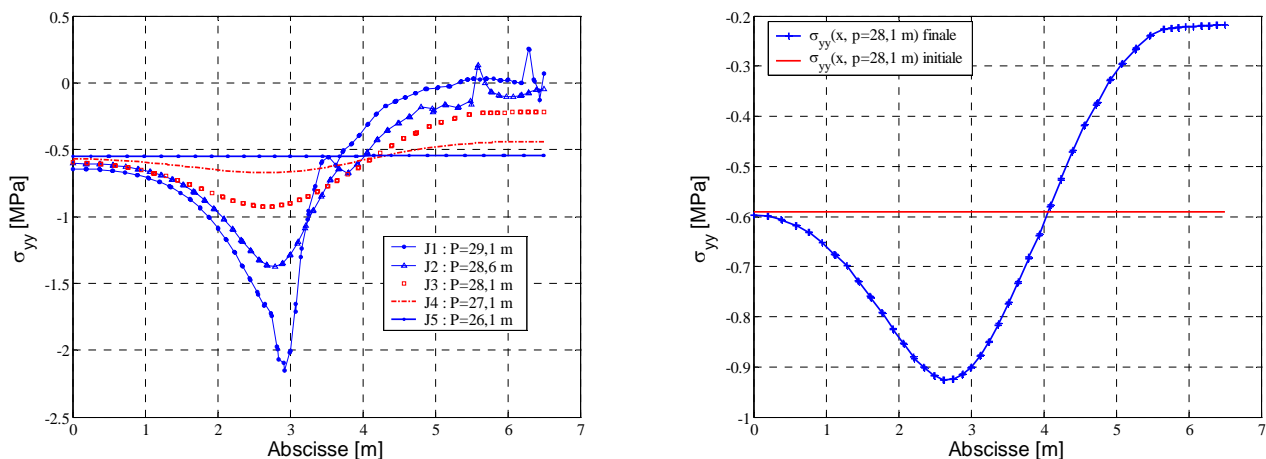


Figure 9 : Distribution de la contrainte verticale σ_{yy} agissant au niveau des différents joints (gauche) et exemple au niveau d'un joint (droite).

L'examen de la figure 9, montre que l'hypothèse d'une distribution uniforme de la contrainte verticale est une grossière approximation. Il se produit, pendant l'exploitation un report des charges sur les appuis et un soulagement de la partie centrale. Cependant le report n'est que

partiel et les extrémités des bancs sont sujets à des sollicitations supérieures à la contrainte naturelle initiale.

5. Conclusions

L'objectif de cet article était d'analyser l'application de méthodes analytiques et de modélisation numérique sur un cas concret de stabilité de carrière souterraine. Les méthodes analytiques sont en générale très conservatrices, mais sont faciles d'utilisation. On montre, sur ce cas réel, la pertinence de la modélisation numérique lorsque celle-ci est bien renseignée (stratigraphique et géomécaniques).

Nous avons montré également qu'un examen visuel des carrières, certes indispensable, pouvait s'avérer insuffisant pour statuer sur l'état d'équilibre de cette dernière. En effet la rupture sur la fibre inférieure du banc est en général précédée par des ruptures sur la fibre supérieure de ce même banc. Ces dernières ruptures ne sont malheureusement pas visibles puisque situées dans la matrice rocheuse. L'apport de la modélisation numérique peut s'avérer, dans certains cas, une approche pertinente pour la compréhension des mécanismes régissant le comportement complexe des toits des carrières litée, hétérogènes et aux comportements fortement non-linéaires.

6. Références bibliographiques

- Courbon, J., 1955. *Cours de résistance des matériaux*. Dunod.
- Goodman, R.,E., 1989. *Introduction to rock mechanics*, 2nd edition. John Wiley & Sons.
- Obert, L. Duvall, W., I., 1967. *Rocks mechanics and the design of structures in rock*. John Wiley & Sons.
- Mandel, J., 1959. *Les calculs en matière de pressions des terrains*. Ed La Loire Républicaine, 16 pl. Jean-Jaurès – Saint Etienne – France.
- Maury, V., 1970. *Mécanique des milieux stratifiés*. Dunod.
- Timoshenko, S., Woinowsky-Krieger, S., 1961. *Théorie des plaques et coques*. Librairie Polytechnique CH. Béranger.
- Tritsch,J.J., 1996. Rapport interne INERIS.